

디지털 빔포밍을 위한 다차 샘플링 방법의 실험적 고찰

나 병윤, 정 목근*, 안 영복
건국대학교 전자공학과, 대진대학교 전자공학과*

Experimental consideration of multi-order sampling for digital beamforming

B. Y. Na., M. K. Jeong* and Y. B. Ahn
Department of Electronic Engineering, Konkuk University
Department of Electronic Engineering, Daejin University *

ABSTRACT

In this paper, several bandwidth sampling methods were compared in which contains "multi-order sampling", which was proposed for envelope detections in RF ultrasonic signals by a computer simulation and on experiment quadrature sampling method. The second-order sampling method were compared with it. As a conclusion, a multi-order sampling method, especially 5th order sampling method showed quite good envelope detection property. This means that more economical and quite good performance digital beamforming system can be built by adopting this new bandwidth sampling method.

I. 서 론

초음파는 인체내에 복사될 때 적절한 투과·반사성을 지니므로 이들을 사용하여 체내의 정보를 알아낼 수 있다. 트랜스듀서(transducer)를 통하여 송·수신된 반사파는 빔포밍(beam forming)의 과정을 거쳐 영상으로 재구성된다. 이때 데이터의 합성이나 처리가 용이하고 연속집속이 가능하도록 아날로그 수신파는 A/D 변환기를 통하여 디지털로 바뀌어 사용한다. A/D 변환기의 속도를 낮추고 메모리의 용량을 줄이기 위해서 대역폭 샘플링이 사용된다. 대역폭 샘플링에는 quadrature, analytic, 그리고 2차(second-order)등이 있다. 그중 2차 샘플링은 하드웨어가 디지털이며, 간단하다는 장점이 있으나 다른 방식, 특히 quadrature에 비해 오차가 매우 크다는 단점이 있다. 이러한 오차를 크게 개선한 다차(multi-order) 샘플링을 제안하여 이론적 배경을 설명하고, SNR의 향상에 대해 발표하였다 [6]. 본 논문에서는 실험 데이터를 이용해서 다차 샘플링 방식의 성능을 기존의 quadrature, 2차 샘플링 방식과 비교하는데 있다. 다차 샘플링 방식은 5차 정도를 사용하면 2차 샘플링 방식에 비해 성능이 월등히 좋아질 뿐만 아니라, quadrature 샘플링

방식과 거의 비슷한 성능을 갖는 것으로 판명되었다. 본 논문에서는 신호의 대역폭이 넓으면 analytic 샘플링 방식이 quadrature 방식에 비해 오차가 크기 때문에 비교대상에서 제외하였다.

본 논문의 구성은, 2장에서 여러 가지 대역폭 샘플링에 관한 내용을 소개하고 3장에서는 초음파 실험 장치를 사용하여 획득한 실험데이터를 이용하여 초음파 RF 신호의 포락선 검출에 있어서 quadrature 샘플링, 2차 샘플링과 [6]에서 제안한 바 있는 다차 샘플링 방법의 성능을 비교·분석하였다. 마지막으로 4장에서 결론을 맺었다.

II. 대역폭 샘플링

RF 초음파신호를 정확하게 디지털 집속화하기 위해서는 f_0 가 중심주파수일때 적어도 $8f_0$, 보통 $16f_0$ 의 샘플링율이 요구되며, 이는 $f_0=3.5\text{ MHz}$ 일 때 $28\sim 56\text{ MHz}$ 로써 하드웨어적인 부담이 된다. 그런데, 이때 사용하는 RF 신호는 일정 대역의 신호이므로, 신호를 기저밴드로 낮추어 대역폭 샘플링을 적용하면 샘플링율을 낮출 수 있다. 대역폭 샘플링방식에는 analytic 샘플링, quadrature 샘플링, 2차 샘플링, 그리고 [6]에서 RF 신호 포락선 검출에의 사용가능성을 제시한 바 있는 다차 샘플링방식 등이 있다

II-1. Quadrature 샘플링

대역폭 신호 $x(t)$ 는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$x(t) = x_I(t) \cos \omega_0 t - x_Q(t) \sin \omega_0 t \quad (2-1)$$

위식에서 $x_I(t)$ 는 신호 $x(t)$ 의 inphase 성분, $x_Q(t)$ 는 quadrature-phase 성분을 의미한다. 만약 대역폭 신호가 밴드폭 W 를 갖는다면, $x_I(t)$ 와 $x_Q(t)$ 는 $W/2$ 의 밴드폭을 갖는 저역 신호가 된다. 이러한 대역폭 신호를 90° 위상차의 두정현파를

반송파로 하여 I, Q성분으로 나누어 구하는 대역폭 복조방식을 quadrature 샘플링이라 하며, 그림 1과 같다. 그림과 같은 방법으로 샘플링되어 재구성된 신호는 식 2-2와 같이 나타낼 수 있다[7].

$$\tilde{x}_I(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_I(nT)h(t-nT) \quad (2-2a)$$

$$\tilde{x}_Q(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_Q(nT)h(t-nT) \quad (2-2b)$$

위식에서 $T=W^{-1}$ 이다.

Quadrature 샘플링기법은 우수한 검파 성능을 나타내는 편이지만, 정현파를 곱하는 과정이 보통 아날로그로 처리되어야 하며, 2채널 처리 방식이므로 ADC도 2개를 필요로 하게된다. 즉, quadrature 기법의 단점은 구현의 복잡함과 고급사양을 필요로 함에 있다.

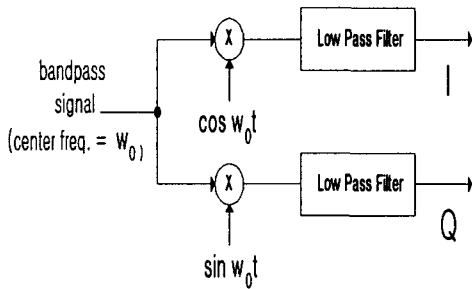


그림 1, Quadrature 샘플링의 블록도

II-2. 2차 샘플링 방식

2차 샘플링은 한 채널에서 그림 2에서처럼 k_i 를 임의로 조절하여 적절한 샘플링을 취하면 Nyquist을 이하로 신호를 복조할 수 있으며[12], $k_i=1/4f_0$ 일 때 스텝 크기 a_i 가 최소가 되어 최소 샘플링율로 밴드신호를 복조가능하다. 이때 k_i 지연 후의 샘플은 quadrature성분이며 2차 샘플링 역시 I, Q성분에 의해 검파하는 대역폭 샘플링으로서 그림 2와 같이 구성한다.

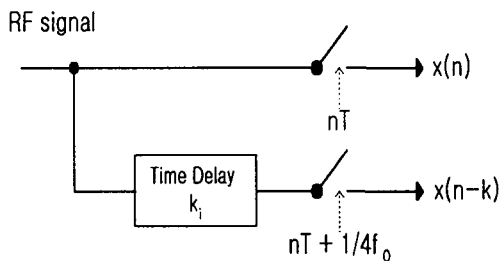


그림 2. 2차 샘플링의 블록도

샘플링된 두 신호를 다음식 2-3처럼 나타낸다면,

$$\begin{aligned} x_1(nT) &= x(nT), \\ x_2(nT) &= x(nT - k) \end{aligned} \quad (2-3)$$

복원된 원 신호는 식 2-4와 같다[7].

$$\begin{aligned} x(t) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_1(nT)h_D(t-mT) \\ &+ \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_2(nT)h_D(-t+mT-k) \end{aligned} \quad (2-4)$$

위식에서 h_D 는 밴드패스 필터이며, 2차 샘플링의 경우 이상적인 필터를 요구한다. 또한 광대역 신호의 경우처럼 신호의 포락선이 순수한 중심주파수 정현파 포락선의 경우와 차이가 크면 오차가 커진다.

II-3. 다차 샘플링 방식

다차 샘플링 방식은 2차 샘플링 방식의 일반화라 볼 수 있으며, 앞에서와 같이 Q성분으로 기인하는 오차를 줄이기 위한 방법이다[6]. 예를 들어 3차인 경우는 그림 3과 같다. 즉 I 성분의 $1/4f_0$ 전후에서 샘플링을 하여, 두 샘플의 평균을 Q성분으로 보는 것이다.

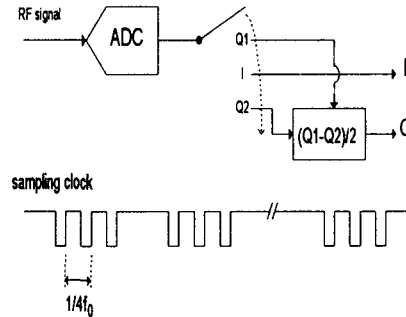


그림 3. 3차 샘플링 방식과 샘플링 클럭
Fig. 3. 3th order sampling method and sampling clock

이의 quadrature 성분을 다음 식과 같다.

$$r_Q(nT) \cong \frac{1}{2} [r(nT+k) - r(nT-k)] \quad (3차)$$

준식은 2차에 비해 오차가 크게 준 것이다. 이 식이 오차를 줄임은 그림 4로 설명된다.

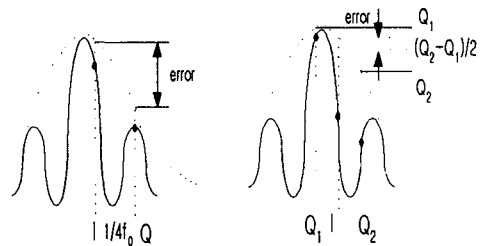


그림 4. 2차, 3차 샘플링 방식의 Q 성분 오차

그림에서 점선이 중심 주파수 f_0 인 대역폭 신호의 포락선, 실선이 RF 신호 일 때, 광대역 신호의 경우 2차 샘플링으로 Q성분의 오차가 커지게 된다. 반면 3차 샘플링의 경우 Q1과 Q2의 평균값을 Q성분으로 보므로, 오차를 줄일 수 있게 된다. 즉, 단지 I 샘플에서 $1/4f_0$ 지연된 샘플을 Q성분으로 보는 2

차 샘플링의 경우, 지연샘플은 단지 중심주파수 f_0 인 정현파만의 Q성분임에 비하면, I성분의 앞뒤 두 샘플을 이용함으로써 보간에 의해 Q 성분의 오차를 줄이게 되는 것이다.

다차 샘플링의 구현은 2차와 마찬가지로, 전 디지털화가 쉽고 quadrature, analytic 샘플링 방식에 비하여 훨씬 간단하여 경제적이다. 한편 차수 i 가 증가할수록 Q성분의 오차는 줄어들게 되는데, 다차 샘플링의 장점이 2차 샘플링의 오차를 줄이면서도 구조의 간결함을 유지하는 것이므로, 차수의 확장에는 제한이 따른다. 차수에 따른 다차 샘플링의 수식 표현은 4차, 5차의 경우 아래와 같다 [6].

$$r_q(nT) = \frac{1}{8} \{ r(nT+3a) + 6r(nT+a) - 3r(nT-a) \} \quad (4차)$$

$$r_q(nT) = \frac{1}{16} \{ r(nT+3a) + 9r(nT+a) - 9r(nT-a) - r(nT-3a) \} \quad (5차)$$

다음 그림은 3차와 5차의 시뮬레이션 결과(실선)이며, 점선은 quadrature 샘플링 방식으로 획득한 포락선이다.

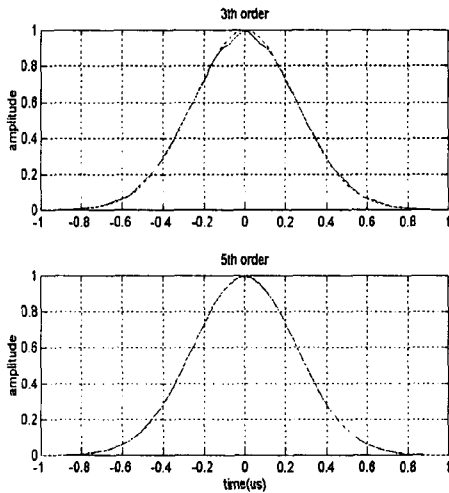


그림 5. 3차와 5차 샘플링의 시뮬레이션 결과.

III. 실험 사양

보통 초음파 영상시스템에서 사용하는 RF 초음파 신호는 광대역 펄스이다. 즉, 펄스 모양은 가우시안 함수의 포락선과, 캐리어에 해당하는 중심주파수 w_0 인 정현파의 곱으로 표현된다.

$$g(t) = \exp\left[-\left(\frac{w_0 t}{\sigma}\right)^2\right], \quad w_0 = 2\pi f_0$$

f_0 : 중심주파수, σ : deviation (4-1)

여기서 σ 는 대역폭과 관계되며, $\sigma=2.5\pi$ 일 경우 대역폭은 3.5 ~ 4MHz이다. 샘플링 속도는 ADC사양이 28MHz 이나, 집속화의 정확도를 높이기 위해 소프트웨어적으로 2배의 보간을 수행하였으므로, 실질적으로는 56MHz이다.

실험에 사용한 팬텀의 모양은 그림 6과 같은 선 모양이다.

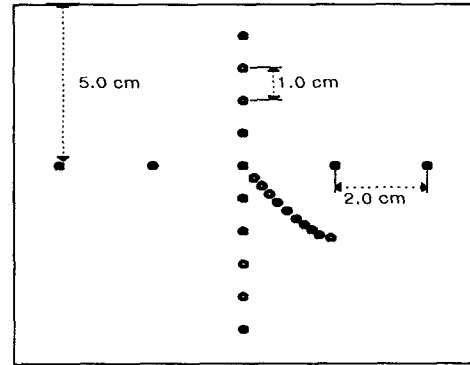


그림 6. 팬텀의 내부모양

IV. 결과

그림 7은 quadrature와 2차, 3차, 샘플링 방식으로 구한 영상이다. 그림에서 quadrature 샘플링 방식으로 획득한 영상과 비교해볼 때, 2차 샘플링 방식으로 합성한 영상은 포인트들의 모양이 거칠다는 것을 볼 수 있으며, 3차 샘플링 방식으로 획득한 영상이 기준영상과 비슷함을 볼 수 있다. 즉, 영상만을 볼 때, 3차의 샘플링만 하더라도 결과가 우수함을 알 수 있다. 이러한 성능을 세밀하게 비교하기 위하여 영상 내에서 축방향 즉, 수직방향으로 일직선상에 놓인 6개의 점이 있는 부분의 단면을 그림 8에서 나타내었다. 그림에서 수평축은 축방향으로 512 pixel을 나타내며, 크기는 256 gray 레벨이다. 그리고 그림 9는 2차, 3차, 5차 샘플링 방식으로 얻은 영상의 축방향 단면 포락선을 quadrature 샘플링 방식과 비교하였을 때, 그 차이 값을 dB단위로 나타낸 것이다.

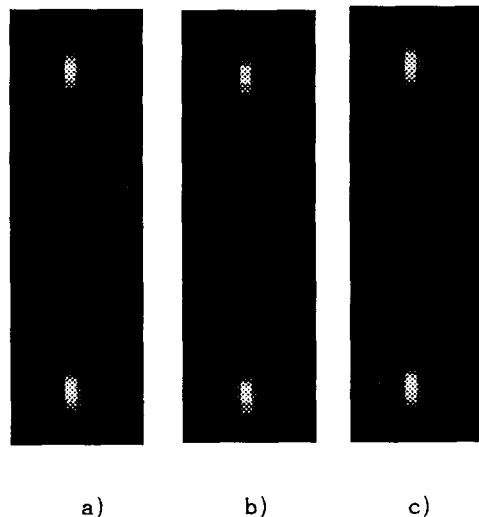


그림 7. a) Quadrature, b) 2차, c) 3차 샘플링 방식으로 구한 Phantom 영상

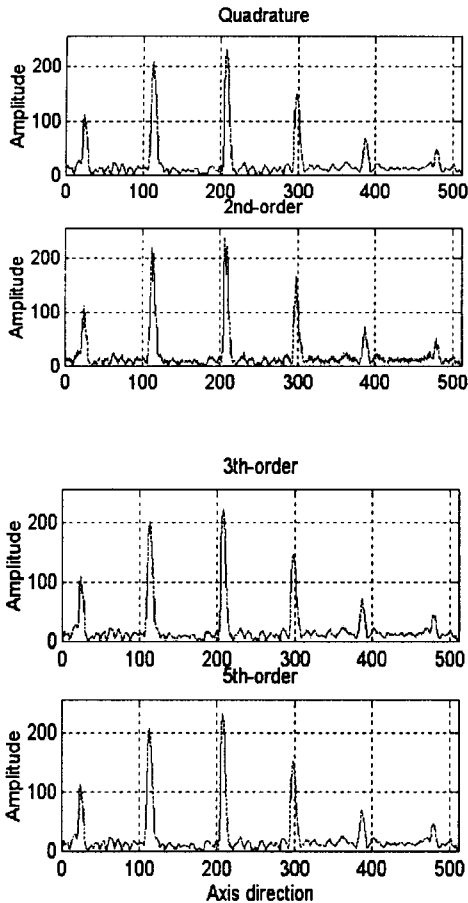


그림 8. Quadrature, 2차, 3차, 5차 샘플링 방식으로 얻은 영상의 축방향 단면 신호 비교

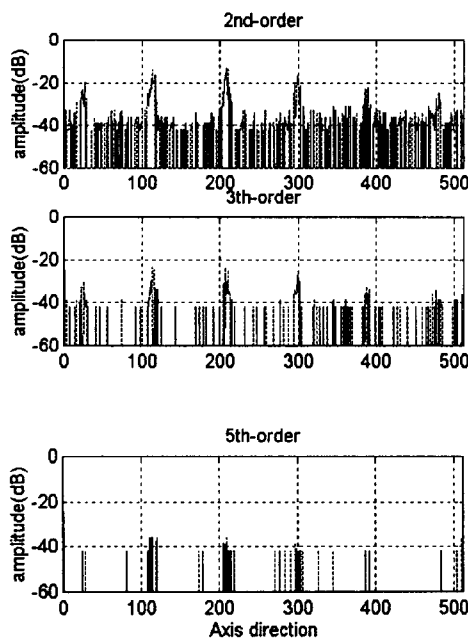


그림 9. Quadrature와 2차, 3차 샘플링 방식으로 얻은 영상들의 축방향 단면 신호의 차이값

그림 8에서, 2차 샘플링으로 얻은 데이터들은 전반적으로 리플이 심하고, 이로 인해 quadrature 방식으로 획득한 기준 포락선과 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 반면, 3차 샘플링은 오차가 상당량 개선되어 포락선의 형태는 기준 포락선과 어느 정도 근사하게 보이고 있지만, 포인트 타겟들이 위치하는 점에서 소량의 오차가 발생함을 알 수 있다. 그러나 5차 샘플링으로 얻은 영상의 경우, 이러한 오차 값은 현저하게 줄어서 두 신호의 포락선이 거의 동일하게 나타남을 볼 수 있다.

V. 결론

실험데이터를 획득하여 다양한 샘플링 방식으로 영상을 합성해본 결과, 그림 6, 7, 8에서 볼 수 있듯이 다차 샘플링 방법은 2차 샘플링 방법에 비하여 비교적 만족할 만한 성능을 보였으며, 특히 차수가 5차인 경우 매우 좋은 성능을 보여주고 있다. 실험 데이터로 얻은 B모드 영상에서는 3차 샘플링만 하더라도 영상의 질이 기준 영상과 비슷함을 알 수 있다. 이러한 성능은 기존의 quadrature 샘플링 방식에 필적하면서도 시스템의 디지털화, 경제성을 갖는 초음파 영상장치의 구현 가능성이 확인되었다. 본 연구에서 더욱 진행되어야 할 사항은 샘플링 위치의 오차가 다차 샘플링의 성능에 미치는 영향과 다차 샘플링 방식을 채용한 실질적인 집속 시스템의 구현에 관한 연구이다.

참고 문헌

- [1] A. Maconski, "Medical Imaging System", Prentice-Hall, INC., 1983.
- [2] B. G. Bardsley and D. A. Christensen, "Beam pattern from pulsed ultrasonic transducers using linear systems theory", J. Acoustical Society of America, 69(1), Jan. 1981.
- [3] J. H. Kim and T. K. Song and S. B. Park, "A pipelined sampled delay focusing in ultrasound imaging systems", ultrasonic imaging, vol. 9, 1987.
- [4] O. D. Grace and S. P. Pitt, "Quadrature sampling of High-Frequency Waveforms", J. Acoustical Society of America, vol. 44, 1968.
- [5] J. L. Brown, "On Quadrature sampling of Bandpass Signals", IEEE trans. on Aerospace and Electronic systems, vol. aes-15, no. 3, May 1979.
- [6] Weon-Hee Cho and Young-Bok Ahn, "Multi-order Sampling for Digital Beamforming of Wide-band Signals", IEEE Trans. on ultrasonics, vol. 43, no. 3, May 1996.
- [7] R. G. Pridham, R. A. Mucci, "Digital Interpolation Beamforming for Low-Pass and Band-Pass Signals", proceedings of the IEEE, vol. 67, no. 6, June 1979. pp 904 - 919